

(19)



Europäisches Patentamt

European Patent Office

Office européen des brevets



(11)

EP 1 329 631 A2

(12)

EUROPÄISCHE PATENTANMELDUNG

(43) Veröffentlichungstag:
23.07.2003 Patentblatt 2003/30

(51) Int Cl.7: F02P 23/04

(21) Anmeldenummer: 03000165.5

(22) Anmeldetag: 07.01.2003

(84) Benannte Vertragsstaaten:
AT BE BG CH CY CZ DE DK EE ES FI FR GB GR
HU IE IT LI LU MC NL PT SE SI SK TR
Benannte Erstreckungsstaaten:
AL LT LV MK RO

(72) Erfinder:
• Herdin, Günther
6200 Jenbach (AT)
• Klausner, Johann
6391 St. Jakob i.H. (AT)

(30) Priorität: 22.01.2002 AT 1002002

(74) Vertreter: Torggler, Paul Norbert, Dr. et al
Patentanwälte Torggler & Hofinger
Wilhelm-Greil-Strasse 16
Postfach 556
6020 Innsbruck (AT)

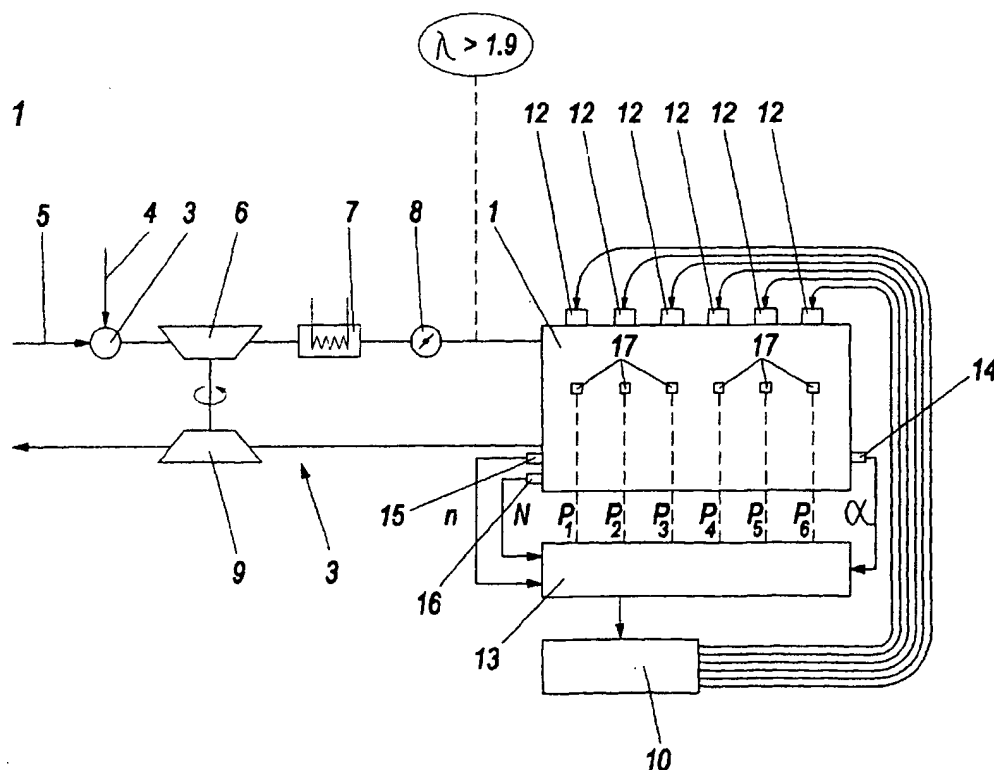
(71) Anmelder: Jenbacher Zündsysteme GmbH
6200 Jenbach (AT)

(54) **Verbrennungsmotor**

(57) Verbrennungsmotor mit mindestens einem Zylinder, bei dem die Verbrennung eines im Zylinder durch einen Kolben komprimierten homogenen Kraftstoff-Luft-Gemisches durch eine zeitlich gesteuerte Fremdzündung eingeleitet wird, wobei das Kraftstoff-Luft-Verhältnis des Kraftstoff-Luft-Gemisches im Brennraum

(25) größer als 1,9 ist und zur zeitlich gesteuerten Fremdzündung mindestens eine Laserlichtquelle (10), mindestens eine optische Übertragungseinrichtung (11) und mindestens eine Einkopplungsoptik (12) zum Fokussieren von Laserlicht in einen Brennraum (25) vorgesehen sind.

Fig. 1



EP 1 329 631 A2

Beschreibung

[0001] Die Erfindung betrifft einen Verbrennungsmotor mit mindestens einem Zylinder, bei dem die Verbrennung eines im Zylinder durch einen Kolben komprimierten homogenen Kraftstoff-Luft-Gemisches durch eine zeitlich gesteuerte Fremdzündung eingeleitet wird.

[0002] Derartige Motoren werden in der Literatur als Ottomotoren bezeichnet. Sie können beispielsweise als Vergaser-Ottomotoren, Einspritz-Ottomotoren oder Gas-Ottomotoren ausgeführt sein, wobei letztere mit einem im Normalzustand gasförmigen Kraftstoff betrieben werden. Bei Ottomotoren wird ein homogenes Kraftstoff-Luft-Gemisch (Variation des Kraftstoff-Luft-Verhältnisses λ über den Brennraum von weniger als 10%) über eine Fremdzündung, üblicherweise eine Zündkerze, gezündet. Vor allem bei stationären Gasmotoren mit immer höheren spezifischen Leistungen hat sich gezeigt, dass die Standzeiten der Zündkerzen nicht zufriedenstellend lange sind. Man hat dann versucht, durch Edelmetallaufgaben, beispielsweise Platinlegierungen, die Standzeiten zu erhöhen. Dies ist auch teilweise gelungen, jedoch sind die Standzeiten insgesamt immer noch nicht zufriedenstellend. Ungünstig ist auch die Tatsache, dass bei Zündkerzen der Elektrodenabstand nach einer bestimmten Betriebsdauer nachgestellt werden muss. Dazu ist das Abschalten des Verbrennungsmotors nötig.

[0003] Weiters ist es bekannt, Motoren in magerer Betriebsweise zu betreiben, dh mit einem Kraftstoff-Luft-Verhältnis λ , welches weit über dem stöchiometrischen Kraftstoff-Luft-Verhältnis von $\lambda = 1$ liegt. Typische λ -Werte von solchen Magermotoren mit einem homogenen Kraftstoff-Luft-Gemisch bei Erdgas liegen in der Größenordnung von 1,4 bis 1,7. Im günstigsten Fall sind Werte bis zu 1,8 möglich. Zur Reduzierung der Schadstoffemissionen, insbesondere der NO_x -Anteile in den Abgasen, wäre ein höherer λ -Wert, also ein magereres Gemisch günstig. Versuche der Anmelderin und die einschlägige Literatur (beispielsweise "Internal Combustion Engine Fundamentals, John B. Heywood, McGraw Hillbook Company, 1988, Seiten 403 und 426) zeigen jedoch klar, dass mit einer Funkenzündung über Zündkerzen magerere Gemische mit einem λ -Wert von über etwa 1,7 in einem Verbrennungsmotor (Ottomotor) mit homogenem Kraftstoff-Luft-Gemisch nicht zündbar sind.

[0004] Zur Vermeidung dieser Probleme ist nun erfindungsgemäß vorgesehen, dass das Kraftstoff-Luft-Verhältnis des Kraftstoff-Luft-Gemisches im Brennraum größer als 1,9 ist und zur zeitlich gesteuerten Fremdzündung mindestens eine Laserlichtquelle, mindestens eine optische Übertragungseinrichtung und mindestens eine Einkopplungsoptik zum Fokussieren von Laserlicht in einen Brennraum vorgesehen sind.

[0005] Versuche der Anmelderin haben gezeigt, dass mit einer Laserzündung anstelle der bisherigen Funkenzündung über Zündkerzen auch sehr magerere Gemische

mit einem Kraftstoff-Luft-Verhältnis λ von größer als 1,9 sicher zündbar sind. Die Zündung von Kraftstoff-Luft-Gemischen mittels Laserzündung ist an sich bereits bekannt. Überraschenderweise haben aber Versuche der Anmelderin gezeigt, dass das bestehende Vorurteil der Fachwelt, dass sich magerere Kraftstoff-Luft-Gemische mit einem λ -Wert von größer als 1,7 nicht fremdzünden lassen, gerade mit der Laserzündung überwinden lassen. Es wurde somit erstmals ein fremdgezündeter, sehr magerer Ottomotor möglich, der sich neben einem geringen Kraftstoffverbrauch auch durch sehr niedrige Emissionswerte, insbesondere NO_x -Werte auszeichnet.

[0006] Versuche der Anmelderin haben gezeigt, dass die Laserzündung auch bei magersten Kraftstoff-Luft-Gemischen mit einem λ -Wert von größer als 2 und sogar größer als 2,1 sicher gezündet werden können. Solche Magermotoren stellen bevorzugt die Ausführungsformen der Erfindung dar.

[0007] Eine Variante der Erfindung besteht darin, dass zur zeitlich gesteuerten Fremdzündung mindestens eine Laserlichtquelle, mindestens eine optische Übertragungseinrichtung und mindestens eine Einkopplungsoptik zum Fokussieren von Laserlicht in einen Brennraum vorgesehen sind, und dass der Kolben mindestens eines Zylinders eine Kolbenmulde aufweist und wenigstens ein Fokus des Laserlichts bei oberer Totpunktstellung des Kolbens in der Kolbenmulde liegt. Die Laserzündung ermöglicht es, den Zündort des Kraftstoff-Luft-Gemisches "tiefer" in den Brennraum, insbesondere in die Kolbenmulde zu legen. Es hat sich gezeigt, dass sich dies günstig auf die Zündfähigkeit auswirkt.

[0008] Überraschenderweise hat sich herausgestellt, dass die Zündenergie des oder der für einen Zündvorgang eingesetzten Laserlichtpuls(e) unter 20 mJ (Millijoule) und bei optimalem Zündort sogar unter 3 mJ liegen kann. Dies wiederum ermöglicht den Einsatz von sehr kostengünstigen Lasern, beispielsweise einem Nd:YAG-Lasern. Es ist sogar möglich, direkt Laserdioden als Laserlichtquellen für den Zündlaserpuls zu verwenden.

[0009] Während bisherige Überlegungen dahin gingen, den Laserlichtstrahl möglichst stark herunterzufokussieren, um eine hohe räumliche Energiedichte zu bekommen, haben wiederum Versuche der Anmelderin gezeigt, dass ein endlicher, nicht gegen Null gehender Strahlquerschnitt des Laserlichtstrahles im Fokus günstig ist. Besonders günstig ist eine in etwa glockenförmige laterale Intensitätsverteilung mit einer Halbwertsbreite in der Größenordnung zwischen 20 μm und 300 μm , vorzugsweise zwischen 40 μm und 100 μm . Es ist entgegen früherer Erwartungen also durchaus günstig, wenn die Intensitäts-Halbwertsbreite über 40 μm liegt, was sich durch eine entsprechende Einkopplungsoptik leicht erreichen lässt.

[0010] Zur Zündung von besonders mageren Kraft-

stoff-Luft-Gemischen (vor allem bei großvolumigen stationären Gasmotoren) ist es günstig, wenn zur zeitlich gesteuerten Fremdzündung mindestens eine Laserlichtquelle, mindestens eine optische Übertragungseinrichtung und mindestens eine Einkopplungsoptik zum Fokussieren von Laserlicht in einen Brennraum vorgesehen sind, und dass zum Zünden des Kraftstoff-Luft-Gemisches in einem Zylinder zwei oder mehrere Laserlichtstrahlen mit räumlich versetzter Fokusslage vorgesehen sind. Durch diese Maßnahme kann auch bei sich relativ langsam ausbreitenden Flammfronten in mageren Kraftstoff-Luft-Gemischen eine zuverlässige Zündung erzielt werden.

[0011] Es ist bei Ottomotoren grundsätzlich bereits bekannt, pro Arbeitstakt zwei oder mehrere Zündimpulse zur Zündung an verschiedenen Orten zu verwenden. Bei stationären Magergasmotoren wurde eine Mehrfachzündung bisher jedoch nicht eingesetzt. Versuche der Anmelderin haben gezeigt, dass mit einer solchen Doppeloder Mehrfachzündung bei Magermotoren hervorragende Ergebnisse erzielt werden können. Es ist zu vermuten, dass die guten Zündeigenschaften bei dieser Variante darauf zurückzuführen sind, dass der erste Laserpuls eine Dissoziation der Kraftstoffanteile in Komponenten hervorruft, die dann durch den zweiten oder weitere Laserpulse leichter entzündbar sind.

[0012] Jedenfalls ermöglicht diese Doppel- oder Mehrfachzündung auch eine direkte Intensitätsregelung, wenn man den Zylinderdruck jedes Zylinders aktiv erfasst und einer Regeleinrichtung zuführt. Man kann nämlich anhand des Zylinderdrucks leicht feststellen, ob der erste Laserpuls bereits zur Zündung geführt hat. Wenn dies der Fall ist, können der zweite und allfällige weitere Laserpulse auf einem Standardniveau bleiben. Hat aber der erste Laserpuls nicht zu einer Zündung geführt, was sich in einem geringeren Zylinderdruckanstieg widerspiegelt, so kann die Motorsteuerung bzw. die darin vorgesehene Regelung sofort den zweiten Laserpuls in seiner Intensität und gegebenenfalls in seiner Dauer erhöhen, um dennoch eine sichere Zündung bei diesem Arbeitstakt zu erzielen.

[0013] Weitere Vorteile und Einzelheiten der Erfindung werden anhand der nachfolgenden Figurenbeschreibung näher erläutert.

Die Fig. 1 zeigt ein Schema eines Ausführungsbeispiels eines erfindungsgemäßen Verbrennungsmotors,

die Fig. 2 zeigt eine Ausführungsvariante eines Zylinders eines erfindungsgemäßen Verbrennungsmotors in einem schematischen Längsschnitt,

die Fig. 3 zeigt dieselbe Darstellung wie die Fig. 2 für ein anderes Ausführungsbeispiel, die Fig. 4a und 4b zeigen den Intensitätsverlauf des Laserlichtstrahles im Fokus in eine erste Richtung X senkrecht auf den Laserlichtstrahl und in eine zweite auf die Richtung X senkrecht in Richtung Y,

die Fig. 5 zeigt den zeitlichen Verlauf der Laserlicht-

intensität bei einer geregelten Dreifachzündung pro Arbeitstakt,

die Fig. 6 zeigt ein Ausführungsbeispiel des erfindungsgemäßen Verbrennungsmotors anhand eines Zylinders mit einer Vorkammer.

[0014] Bei dem in Fig. 1 dargestellten Verbrennungsmotor handelt es sich um einen sechszylindrigen stationären Gas-Ottomotor 1 mit einem Einlasstrakt 2 und einem Auspufftrakt 3. In einem Gasmischer 3 wird über die Leitung 4 zugeführtes Gas, beispielsweise Methan, mit über die Leitung 5 zugeführter Luft gemischt. Anstelle eines üblichen Gasmischers kann auch eine Eindüsung von Gas in eine Luftleitung erfolgen.

[0015] Über den Turbolader-Verdichter 6 wird das Gas-Luft-Gemisch verdichtet und gelangt über den Gemischkühler 7 und die Drosselklappe 8 in den Raum vor die nicht näher dargestellten Einlassventile des Motors 1. In der Abgasleitung 3 ist das Turbinenrad 9 des Turboladers angeordnet. Soweit entspricht die Motoranordnung dem Stand der Technik.

[0016] Neu ist, dass der in Fig. 1 dargestellte Motor mit einem Kraftstoff-Luft-Verhältnis λ größer als 1,9 betrieben ist und zur Zündung eine Laserzündung vorgesehen ist. Diese Laserzündung umfasst eine allgemein mit 10 bezeichnete Laserlichtquelle, eine beim vorliegenden Ausführungsbeispiel aus flexiblen Lichtleitern 11 bestehende optische Übertragungseinrichtung und für jeden der sechs Zylinder eine schematisch dargestellte Einkopplungsoptik 12. Diese Einkopplungsoptik besteht im wesentlichen aus einer fokussierenden Linse bzw. Linsenanordnung und einem Brennraumfenster, über das das Licht von außen in den Brennraum gelangen kann. Die Laserlichtquelle 10 wird von einer elektronischen Motorsteuerung 13 angesteuert, die aus dem Winkelgeber 14, einem Kurbelwinkelwert α und die schematisch dargestellten Aufnehmer bzw. Messeinrichtungen 15 und 16 Werte empfängt, die der Motorleistung N bzw. der Drehzahl n entsprechen. Außerdem empfängt die elektronische Motorsteuerung noch Werte für den aktuellen Zylinderdruck, welcher über Aufnehmer 17 erfasst wird. Die Zylinderdruckwerte sind mit P1 bis P6 bezeichnet. Zur zeitlichen Festlegung der Laserzündimpulse zu den einzelnen Zylindern wird vor allem das Kurbelwellenwinkelsignal herangezogen, wie dies bei Funkenzündungen an sich bereits bekannt ist.

[0017] Es kann für jeden Zylinder ein eigener Laser in der Laserlichtquelle 10 vorgesehen sein. Es ist aber auch möglich, mit einem einzigen Laser zu arbeiten und die Laserlichtstrahlen für die einzelnen Zylinder, beispielsweise durch Strahlteiler oder rotierende Spiegel, aufzuteilen.

[0018] Als Laserlichtquellen für einen oder mehrere Zylinder können vorzugsweise diodenlasergepumpte Festkörperlaser, wie beispielsweise YB-Laser oder Nd/YAG-Laser, vorgesehen sein. Diese Laserlichtquellen können einen aktiv oder passiv gütegeschalteten Laser

umfassen, um eine exakte zeitliche Triggerung zu erlauben. Die Wellenlänge des verwendeten Laserlichts liegt günstigerweise über 400 nm, vorzugsweise über 800 nm, also im Infrarotbereich. Andere Wellenlängen sind aber durchaus denkbar und möglich.

[0019] Es hat sich gezeigt, dass es ausreicht, wenn die Zündenergie des für einen Zündvorgang eingesetzten Laserpulses unter 20 mJ, vorzugsweise unter 5 mJ liegt. Selbst bei magerer Betriebsweise kann man bei optimaler Lage des Fokus und der Intensitätsverteilung sogar mit Zündenergien von unter 3 mJ auskommen. Die Pulsdauer des einzelnen Laserlichtpulses liegt günstigerweise zwischen 1 ns und 10 ns, vorzugsweise zwischen 5 ns und 50 ns. Dies erlaubt auch den Einsatz von Laserdioden, die direkt den Zündlaserpuls bereitstellen, als nicht nur einen Festkörperlaser pumpen.

[0020] Unter nunmehriger Bezugnahme auf die Fig. 2 wird ein Ausführungsbeispiel näher erläutert. Im Zylinder 18 ist ein Kolben 19 in oberer Totpunktstage dargestellt. Der Kolben 19 weist eine Kolbenmulde 19a mit einer Tiefe t zwischen der Oberkante 19b und dem Boden 19c der Kolbenmulde auf. Das Einlassventil 20 und das Auslassventil 21 sind nur schematisch dargestellt, weil sie dem Stand der Technik entsprechen. Der Kolben kann auch eine Brennraumscheibe bzw. eine Vertiefung, die bis an die Zylinderbüchse reicht, aufweisen. Bei der einer solchen, beispielsweise um eine Nase ringförmig umlaufenden Vertiefung handelt es sich um eine "außenliegende" Kolbenmulde.

[0021] Anstelle der bisherigen Zündkerze ist nunmehr ein Brennraumfenster 22 vorzugsweise aus Saphir vorgesehen, über das Laserlicht 23 nach Fokussierung über die Linse 24 in den Brennraum 25 als getriggert Laserzündimpuls eingebracht wird.

[0022] Wie die Fig. 2 zeigt, handelt es sich bei dem Brennraum 25 um einen vorkammerlosen Hauptbrennraum, in dem der Fokus 26 des Laserlichts liegt.

[0023] Genauer gesagt, liegt der Fokus 26 des Laserlichts in der Kolbenmulde 19a des Kolbens 19, und zwar in einem Abstand a , der zwischen 25% und 75% der Muldentiefe d beträgt. Durch diese räumliche Lage des Fokus weit im Inneren des Brennraumes wird eine gute Entzündung auch bei mageren Kraftstoff-Luft-Gemischen über einem Lambda-Wert von 1,9 erzielt.

[0024] Die Fig. 3 zeigt eine andere Ausführungsform mit zwei Brennraumfenstern 22 und zwei Einkopplungsoptiken 24, die jeweils einen über die Lichtleitphase 11 zugeführten Laserlichtimpuls an räumlich versetzten Stellen (Fokus 26) in den Brennraum hineinfokussieren. Bei diesem Ausführungsbeispiel gibt es also zwei räumlich beabstandete Zündstellen, was vor allem bei sehr mageren Kraftstoff-Luft-Gemischen und großvolumigen Motoren zu einer verbesserten Zündung führt. Die beiden Laserlichtpulse können aus derselben Laserlichtquelle bzw. demselben Laser stammen. Es ist aber auch möglich, getrennte Laser zu verwenden. Auch können diese beiden Laserlichtpulse zeitlich versetzt zur Zündung während ein und desselben Arbeitstaktes bzw. zur

Einleitung desselben eingesetzt werden.

[0025] Die Laserzündung erlaubt auch durch das mögliche kleine Brennraumfenster einen seitlichen Zugang zum Brennraum (zB normal zur Zylinderachse).

[0026] Die Einkopplungsoptik kann eine oder mehrere Linsen 24 aufweisen. Es ist aber auch möglich, das Brennraumfenster 22 selbst als Linse zu gestalten.

[0027] Wie bereits eingangs erwähnt, ist es günstig, wenn die Einkopplungsoptik den Laserlichtstrahl nicht auf einen maximal kleinen Strahlquerschnitt herunterfokussiert. Vielmehr hat sich gezeigt, wenn die quer zur Strahlrichtung gemessene maximale Intensitätshalbwertsbreite des Laserlichtstrahls im Fokus zwischen 20 μm und 300 μm , vorzugsweise zwischen 40 μm und 100 μm liegt.

[0028] Die Fig. 4a und 4b zeigen die Intensitätsverteilung in die beiden untereinander senkrechten und beide senkrecht auf die Strahlrichtung liegenden Richtungen X und Y. Diese Fig. 4a und 4b zeigen, dass die Intensitäts-Halbwertsbreiten in den Richtungen X und Y, nämlich die Größen B_X und B_Y verschieden groß sind. Sie liegen aber beide günstigerweise in dem oben angeführten Bereich. Jedenfalls ist es günstig, wenn die Intensitäts-Halbwertsbreiten B_X und B_Y über 40 μm liegen. Ebenfalls günstig hat sich eine im Querschnittsprofil glockenförmige Intensitätsverteilung, wie sie die Fig. 4a und 4b in etwa zeigen, als günstig herausgestellt.

[0029] Die Fig. 5 zeigt eine zeitliche Abfolge von Laserzündimpulsen zur Zündung bzw. Einleitung aufeinanderfolgender Arbeitstakte, wobei pro Zündvorgang 3 Intensität verschieden hohe Laserlichtimpulse in knapper zeitlicher Aufeinanderfolge zum Einsatz kommen. Durch eine solche zeitlich gestaffelte Mehrfachzündung kann eine zuverlässige Entzündung auch von sehr mageren Kraftstoff-Luft-Gemischen erzielt werden. Außerdem erlaubt eine solche Mehrfachzündung eine Echtzeitregelung der Laserlichtintensität über den Zylinderdruck, und zwar dergestalt, dass dann, wenn der erste Laserlichtpuls zu keiner Zündung führt (was an einem flacheren Anstieg des gemessenen Zylinderdruck erkennbar ist), die Intensität des zweiten Laserlichtimpulses erhöht wird, wie dies bei der dritten Zündimpulsgruppe in Fig. 5 rechts gezeigt ist. Die erhöhte Lichtintensität führt dann zu einer sicheren Zündung des Kraftstoff-Luft-Gemisches. Man kann damit die Laserlichtenergie auf ein Minimum reduzieren und dennoch eine zuverlässige Zündung erzielen. Dies ist im Hinblick auf die Kosten und die Lebensdauer der verwendeten Komponenten von großen Vorteil.

[0030] Die Fig. 6 zeigt, dass die erfindungsgemäße Laserzündung auch bei einem Verbrennungsmotor mit einer Vorkammer eingesetzt werden kann.

[0031] Die Vorkammer ist mit 27 bezeichnet. Sie kann, muss aber nicht, eine gesonderte Kraftstoffzuführung (Gasleitung 28) aufweisen. Die Vorkammer weist in üblicher Weise einen Vorkammerbrennraum 27a auf, der über Überströmöffnungen 29 mit dem Hauptbrennraum 25 in Verbindung steht. Der Fokus 26 des von der

Seite über das linsenförmig ausgebildete Brennraumfenster eingekoppelten Laserlichts liegt im Zentrum des Vorkammer-Brennraums 26.

[0032] Die erfindungsgemäße Laserzündung eignet sich nicht nur für stationäre Gasmotoren, sondern auch für (mobile) Benzinmotoren oder (mobile) Gasmotoren.

[0033] Die Laserzündung ist auch geeignet für die neuen Verbrennungskonzepte des Dieselmotors - HCCI (Homogeneous Compressed Charge Ignition), wo sie vorzugsweise als Zündindikator eingesetzt werden kann.

Patentansprüche

1. Verbrennungsmotor mit mindestens einem Zylinder, bei dem die Verbrennung eines im Zylinder durch einen Kolben komprimierten homogenen Kraftstoff-Luft-Gemisches durch eine zeitlich gesteuerte Fremdzündung eingeleitet wird, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Kraftstoff-Luft-Verhältnis des Kraftstoff-Luft-Gemisches im Brennraum (25) größer als 1,9 ist und zur zeitlich gesteuerten Fremdzündung mindestens eine Laserlichtquelle (10), mindestens eine optische Übertragungseinrichtung (11) und mindestens eine Einkopplungsoptik (12) zum Fokussieren von Laserlicht in einen Brennraum (25) vorgesehen sind. 5
2. Verbrennungsmotor nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** jeder Zylinder einen vorkammerlosen Hauptbrennraum (25) mit Ein- und Auslassventilen (20, 21) aufweist und mindestens ein Fokus (26) des Laserlichtes im Hauptbrennraum (25) liegt. (Fig. 2) 10
3. Verbrennungsmotor mit mindestens einem Zylinder, bei dem die Verbrennung eines im Zylinder durch einen Kolben komprimierten homogenen Kraftstoff-Luft-Gemisches durch eine zeitlich gesteuerte Fremdzündung eingeleitet wird, insbesondere nach Anspruch 2, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur zeitlich gesteuerten Fremdzündung mindestens eine Laserlichtquelle (10), mindestens eine optische Übertragungseinrichtung (11) und mindestens eine Einkopplungsoptik (12) zum Fokussieren von Laserlicht in einen Brennraum (25) vorgesehen sind, und dass der Kolben (19) mindestens eines Zylinders eine Kolbenmulde (19a) aufweist und wenigstens ein Fokus (26) des Laserlichts bei oberer Totpunktlage des Kolbens (19) in der Kolbenmulde (19a) liegt. (Fig. 2) 15
4. Verbrennungsmotor nach Anspruch 3, **dadurch gekennzeichnet, dass** der Abstand (a) mindestens eines Fokus (26) des Laserlichts vom Boden (19e) der Kolbenmulde (19a) zwischen 25% und 75% der Muldentiefe (d) liegt. (Fig. 2) 20
5. Verbrennungsmotor nach Anspruch 1, **dadurch gekennzeichnet, dass** jeder Zylinder eine Vorkammer aufweist, in die gegebenenfalls eine gesonderte Kraftstoff-Zufuhr mündet und deren Vorkammer-Brennraum über Überströmöffnungen mit dem Hauptbrennraum in Verbindung steht, wobei mindestens ein Fokus des Laserlichts im Vorkammer-Brennraum liegt und das Kraftstoff-Luft-Verhältnis im Hauptbrennraum oder im Vorkammerbrennraum über 1,9 liegt. 25
6. Verbrennungsmotor nach einem der Ansprüche 1 bis 5, **dadurch gekennzeichnet, dass** er ein vorzugsweise mehrzylindriger Vergaser-Ottomotor, ein Einspritz-Ottomotor oder ein mit im Normalzustand gasförmigen Kraftstoff betriebenen Gas-Ottomotor (1) ist. 30
7. Verbrennungsmotor nach einem der Ansprüche 1 bis 6, **dadurch gekennzeichnet, dass** er ein stationärer Motor (1) ist. 35
8. Verbrennungsmotor nach einem der Ansprüche 1 bis 7, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Laserlichtquelle einen vorzugsweise diodenlasergepumpten Festkörperlaser aufweist, wobei als Festkörperlaser bevorzugt ein Yb-Laser und/oder Nd-Laser - vorzugsweise Nd-Laser mit G⁴⁺-sättigbarem Absorber - und/oder ein Nd/YAG-Laser ist. 40
9. Verbrennungsmotor mit mindestens einem Zylinder, bei dem die Verbrennung eines im Zylinder durch einen Kolben komprimierten homogenen Kraftstoff-Luft-Gemisches durch eine zeitlich gesteuerte Fremdzündung eingeleitet wird, insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 8, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine Laserlichtquelle zumindest eine Laserdiode zum direkten Erzeugen von zur Fremdzündung eingesetzten Laserlichtpulsen aufweist. 45
10. Verbrennungsmotor nach einem der Ansprüche 1 bis 9, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Laserlichtquelle zumindest eine Laserdiode umfasst, deren Licht über eine Einkopplungsoptik, einen vorzugsweise flexiblen Lichtleiter und eine Einkopplungsoptik in den Brennraum gelangt. 50
11. Verbrennungsmotor nach einem der Ansprüche 1 bis 10, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Laserlichtquelle einen aktiv oder passiv gütegeschalteten Laser umfasst. 55
12. Verbrennungsmotor nach einem der Ansprüche 1 bis 11, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Wellenlänge des Laserlichts über 400 nm, vorzugsweise über 800 nm, liegt.

13. Verbrennungsmotor mit mindestens einem Zylinder, bei dem die Verbrennung eines im Zylinder durch einen Kolben komprimierten homogenen Kraftstoff-Luft-Gemisches durch eine zeitlich gesteuerte Fremdzündung eingeleitet wird, insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 12, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur zeitlich gesteuerten Fremdzündung mindestens eine Laserlichtquelle (10), mindestens eine optische Übertragungseinrichtung (11) und mindestens eine Einkopplungsoptik (12) zum Fokussieren von Laserlicht in einen Brennraum (25) vorgesehen sind, und dass die Zündenergie des oder der für einen Zündvorgang eingesetzten Laserlichtpuls(e) unter 20 mJ, vorzugsweise unter 5 mJ liegt.
14. Verbrennungsmotor nach Anspruch 13, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Zündenergie des oder der für einen Zündvorgang eingesetzten Laserlichtpuls(e) unter 3 mJ liegt.
15. Verbrennungsmotor nach einem der Ansprüche 1 bis 14, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Pulsdauer eines Laserlichtpulses zwischen 1 ns und 100 ns, vorzugsweise zwischen 5 ns und 50 ns liegt.
16. Verbrennungsmotor mit mindestens einem Zylinder, bei dem die Verbrennung eines im Zylinder durch einen Kolben komprimierten homogenen Kraftstoff-Luft-Gemisches durch eine zeitlich gesteuerte Fremdzündung eingeleitet wird, insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 15, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur zeitlich gesteuerten Fremdzündung mindestens eine Laserlichtquelle (10), mindestens eine optische Übertragungseinrichtung (11) und mindestens eine Einkopplungsoptik (12) zum Fokussieren von Laserlicht in einen Brennraum (25) vorgesehen sind, und dass die quer zur Strahlrichtung gemessene Intensitäts-Halbwertsbreite (b_x , b_y) des Laserlichtstrahles im Fokus über 40 μm liegt.
17. Verbrennungsmotor mit mindestens einem Zylinder, bei dem die Verbrennung eines im Zylinder durch einen Kolben komprimierten homogenen Kraftstoff-Luft-Gemisches durch eine zeitlich gesteuerte Fremdzündung eingeleitet wird, insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 16, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur zeitlich gesteuerten Fremdzündung mindestens eine Laserlichtquelle (10), mindestens eine optische Übertragungseinrichtung (11) und mindestens eine Einkopplungsoptik (12) zum Fokussieren von Laserlicht in einen Brennraum (25) vorgesehen sind, und dass die quer zur Strahlrichtung gemessene maximale Intensitäts-Halbwertsbreite (b_x , b_y) des Laserlichtstrahles im Fokus (26) zwischen 20 μm und 300 μm , vorzugsweise zwischen 40 μm und 100 μm liegt.
18. Verbrennungsmotor nach einem der Ansprüche 1 bis 17, **dadurch gekennzeichnet, dass** die optische Übertragungseinrichtung flexible Lichtleiter (11) umfasst.
19. Verbrennungsmotor nach einem der Ansprüche 1 bis 18, **dadurch gekennzeichnet, dass** die Einkopplungsoptik ein vorzugsweise aus Saphir bestehendes Brennraumfenster (22) und außerhalb des Brennraumes eine Linse (24) oder eine Linsenanordnung zum Fokussieren von Laserlicht durch das Brennraumfenster (22) hindurch in den Brennraum (25) aufweist.
20. Verbrennungsmotor nach einem der Ansprüche 1 bis 19, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Brennraumfenster (22) der Einkopplungsoptik selbst als Linse ausgebildet ist.
21. Verbrennungsmotor mit mindestens einem Zylinder, bei dem die Verbrennung eines im Zylinder durch einen Kolben komprimierten homogenen Kraftstoff-Luft-Gemisches durch eine zeitlich gesteuerte Fremdzündung eingeleitet wird, insbesondere nach einem der Ansprüche 1 bis 20, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur zeitlich gesteuerten Fremdzündung mindestens eine Laserlichtquelle (10), mindestens eine optische Übertragungseinrichtung (11) und mindestens eine Einkopplungsoptik (12) zum Fokussieren von Laserlicht in einen Brennraum (25) vorgesehen sind, und dass zum Zünden des Kraftstoff-Luft-Gemisches in einem Zylinder (18) zwei oder mehrere Laserlichtstrahlen mit räumlich versetzter Fokusslage (26) vorgesehen sind. (Fig. 3)
22. Verbrennungsmotor nach einem der Ansprüche 1 bis 21, **dadurch gekennzeichnet, dass** für jeden Zylinder zwei oder mehrere Laserlichtquellen vorgesehen sind.
23. Verbrennungsmotor nach einem der Ansprüche 1 bis 22, **dadurch gekennzeichnet, dass** eine elektronische Motorsteuerung (13) vorgesehen, die in Abhängigkeit von erfassten Motorparametern, wie beispielsweise dem Kurbelwellenwinkel (α), der Drehzahl (n), der Motorleistung (N), dem aktuellen Zylinderdruck (P_i) im Brennraum die Laserlichtquelle(n) (10) ansteuert und dabei Laserlichtparameter wie die zeitliche Abfolge, die Pulsdauer und/oder die Zündenergie festlegt.
24. Verbrennungsmotor nach einem der Ansprüche 1 bis 23, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Kraftstoff-Luft-Gemisch pro Arbeitstakt eines Zylinders durch mindestens zwei zeitlich aufeinanderfolgende Laserlichtpulse gezündet wird.

25. Verbrennungsmotor mit mindestens einem Zylinder, bei dem die Verbrennung eines im Zylinder durch einen Kolben komprimierten homogenen Kraftstoff-Luft-Gemisches durch eine zeitlich gesteuerte Fremdzündung eingeleitet wird, insbesondere nach Anspruch 23 und 24, **dadurch gekennzeichnet, dass** zur zeitlich gesteuerten Fremdzündung mindestens eine Laserlichtquelle (10), mindestens eine optische Übertragungseinrichtung (11) und mindestens eine Einkopplungsoptik (12) zum Fokussieren von Laserlicht in einen Brennraum (25) vorgesehen sind, und dass eine Regeleinrichtung vorgesehen ist, die die Zündenergie eines zweiten und/oder allfälliger weiterer Laserlichtpulse während desselben Arbeitstaktes eines Zylinders in Abhängigkeit vom aktuellen Zylinderdruck nach dem ersten Laserlichtpuls regelt. (Fig. 5)
26. Verbrennungsmotor nach einem der Ansprüche 1 bis 25, **dadurch gekennzeichnet, dass** das Kraft-Luft-Verhältnis des Kraft-Luft-Gemisches größer als 2, vorzugsweise größer als 2,1 ist.
27. Verbrennungsmotor nach einem der Ansprüche 1 bis 26, **dadurch gekennzeichnet, dass** als Kraftstoff ein Kohlenwasserstoff oder Kohlenwasserstoffgemisch, insbesondere Benzin, Dieselöl, Erdgas oder Propan, eingesetzt ist.

30

35

40

45

50

55

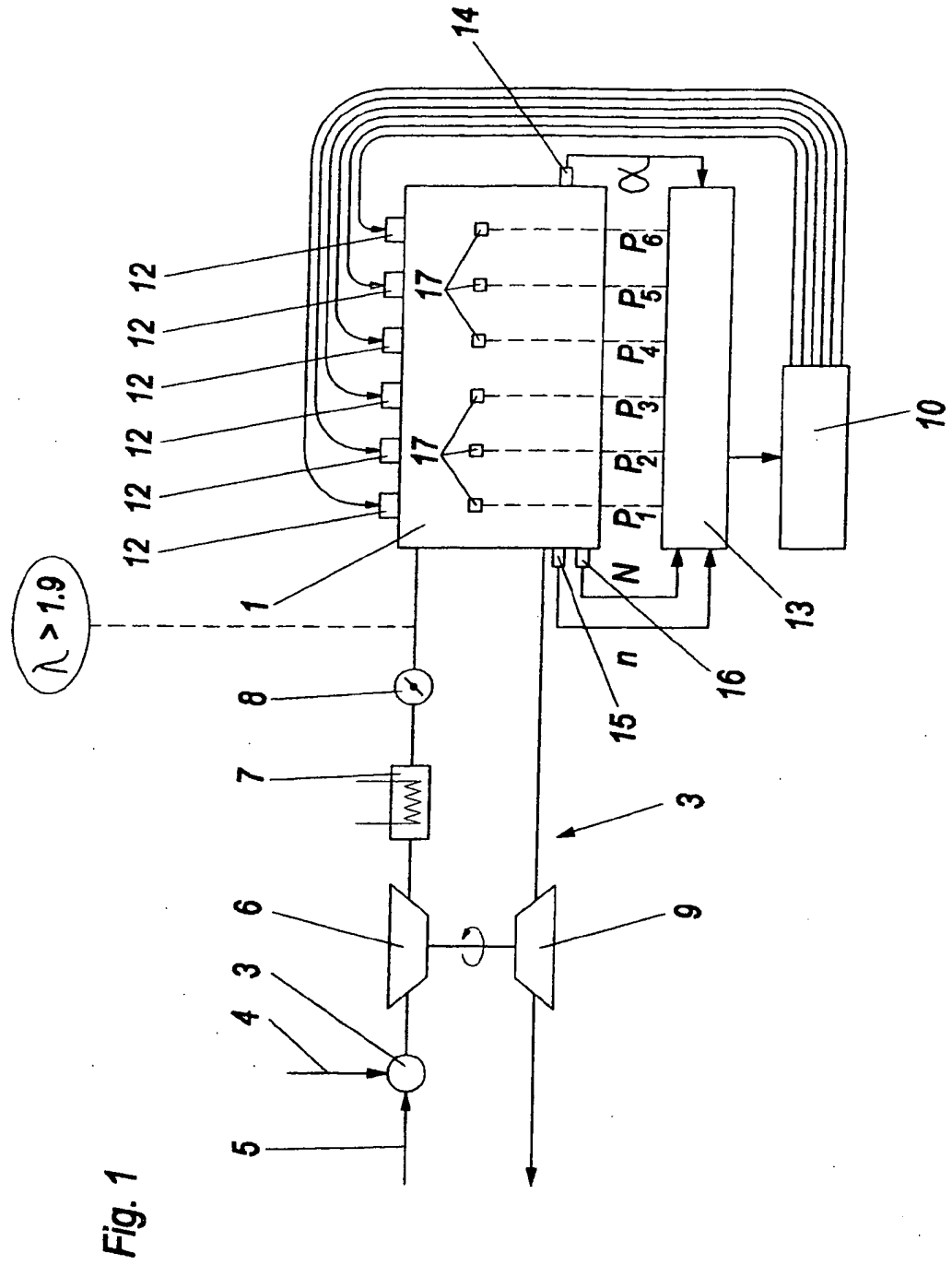


Fig. 2

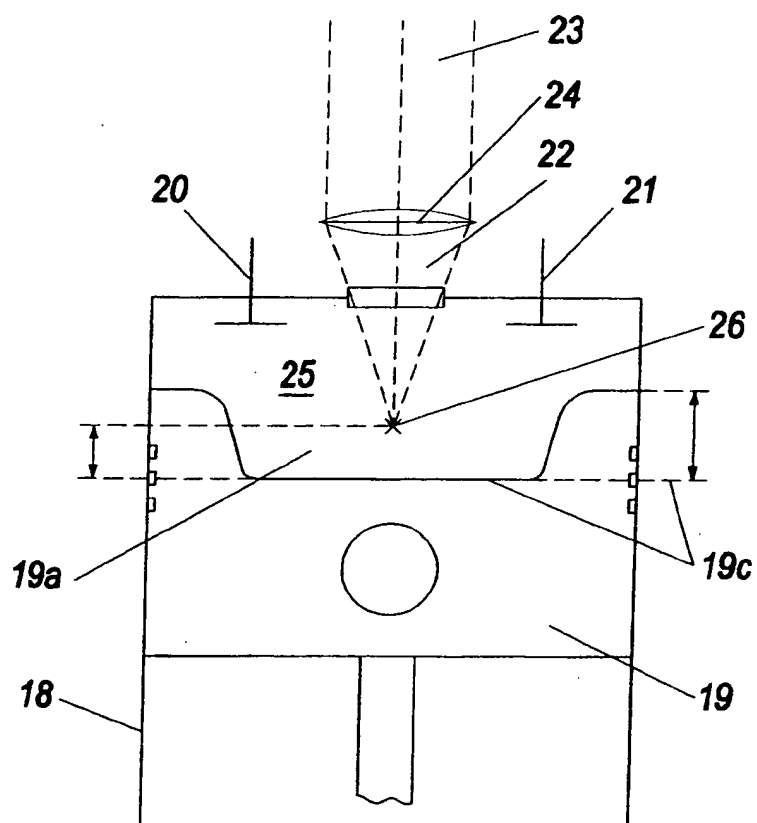


Fig. 3

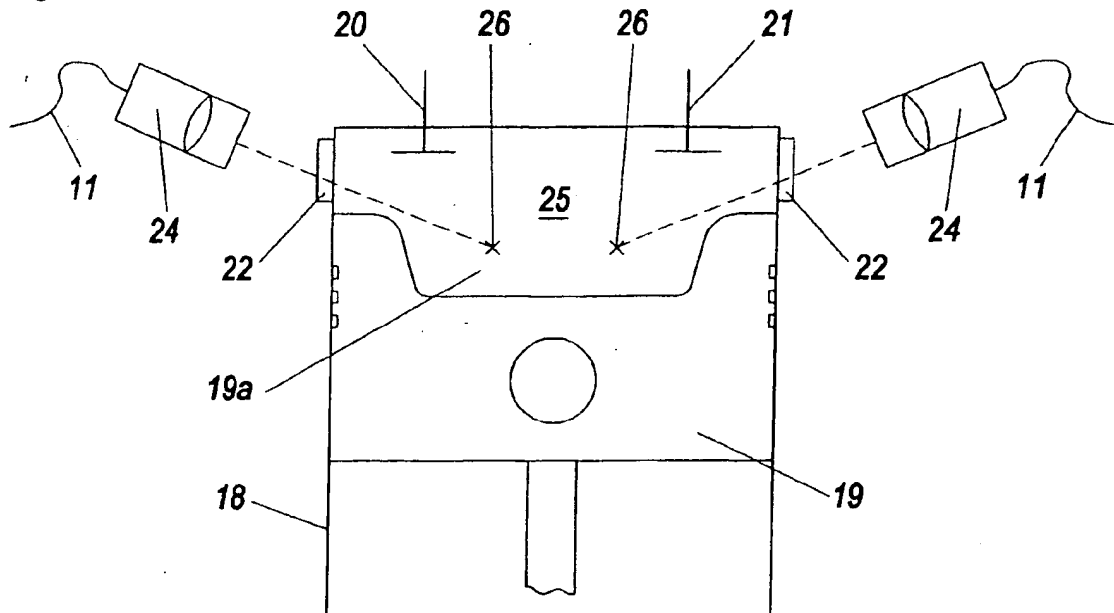


Fig. 4a

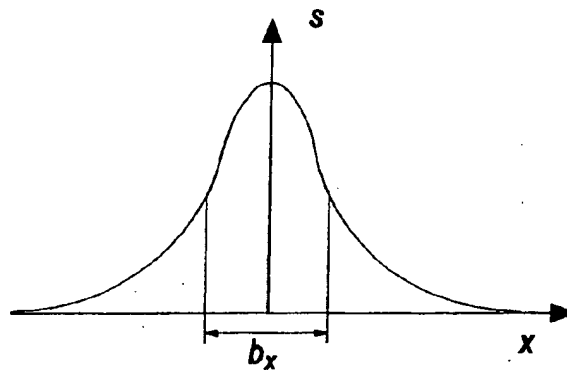


Fig. 4b

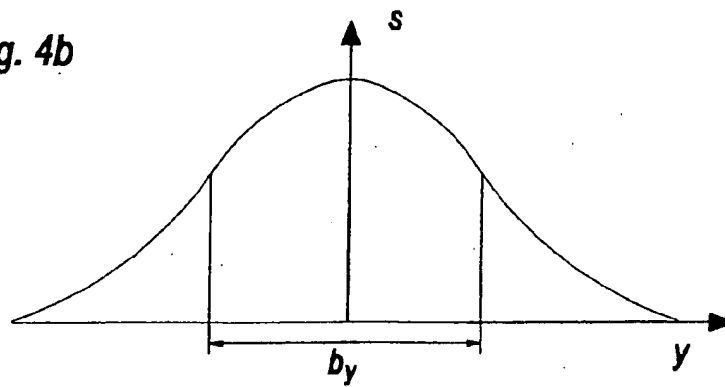


Fig. 5

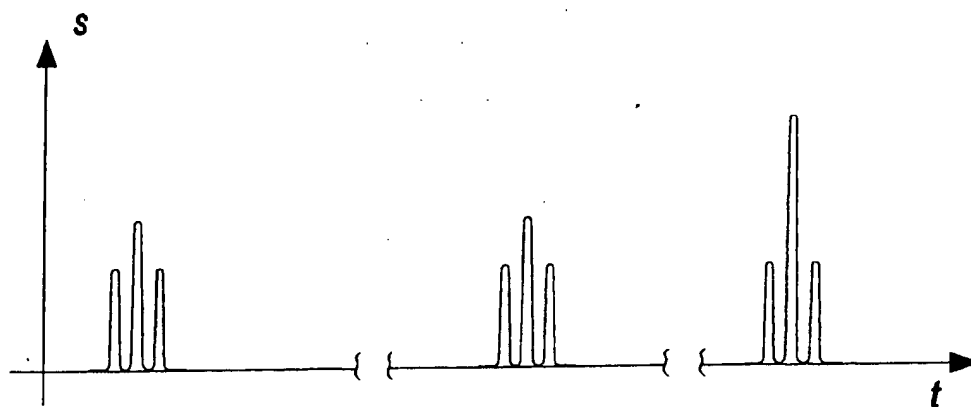


Fig. 6

